SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Fran Jakšić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan Fran Jakšić

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije



Sveučilište u Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 26 -02- 2015	Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3	
Ur.broj: 15-1703-15-120	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Fran Jakšić** Mat. br.: 0035186159

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Nuklearne elektrane danas**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Nuclear power plants today**

Opis zadatka:

Usprkos nepopularnosti nuklearnih elektrana u Europi i svijetu, neke se zemlje ipak odlučuju za gradnju novih nuklearnih postrojenja za podmirenje potreba za električnom energijom. Zbog toga je potrebno usporediti troškove izgradnje nuklearne elektrane s troškovima izgradnje elektrane na ugljen, vjetroelektrane i fotonaponske elektrane.

U okviru zadatka treba:

1. Napraviti pregled izgradnje nuklearnih elektrana u Europi i svijetu.
2. Analizirati utjecaj nuklearne elektrane na okoliš.
3. Opisati sigurnost PWR tipa nuklearnih elektrana.
4. Izračunati troškove izgradnje nuklearne elektrane i usporediti ih s troškovima izgradnje postrojenja baziranih na drugim tehnologijama: ugljenu, suncu i vjetru.

Svi potrebni dodatni ulazni podaci za proračun nalaze se kod mentora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć tokom izrade.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4 . ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem prof. Željku Bogdanu na stručnoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Fran Jakšić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

C	[USD/MWh]	nivelirana cijena električne energije
C_i	[USD/god]	godišnji troškovi kapitala tijekom pogona elektrane svedeni na početak komercijalnog pogona
C_{po}	[USD/god]	troškovi pogona i održavanja
C_g	[USD/god]	troškovi goriva za vrijeme pogona elektrane
CG	[USD/MWh]	cijena goriva
d	[-]	faktor troška dekomisije
E	[MWh/god]	godišnje proizvedena električna energija
FO	[h/god]	faktor opterećenja, broj radnih sati godišnje na punom opterećenju
I	[USD/kW]	investicijski troškovi, bez troškova financiranja
I_F	[USD/kW]	investicijski troškovi, s troškovima financiranja
k_F	[-]	nerizična kamatna stopa
k_L	[-]	premija rizika nelikvidnosti
k_S	[-]	trošak vlastitog kapitala
k_R	[-]	premija rizika
k_{TEH}	[-]	premija rizika tehnologije
L_B	[god]	trajanje izgradnje elektrane
L_T	[god]	životni vijek elektrane
P	[MW]	snaga
p	[-]	stopa poreza
r	[-]	nivelirana diskontna stopa, prosječna stopa troškova kapitala
TZ	[-]	trošak zaduživanja
UVK	[-]	udio vlastitog kapitala
α	[-]	faktor povrata kapitala
η_E	[-]	stupanj iskoristivosti procesa

SAŽETAK

U ovom radu razmotrena je trenutna situacija nuklearnih elektrana u svijetu. U početku se donosi pregled postojećih nuklearnih elektrana u svijetu i planirana izgradnja novih. Uz to je dana podjela nuklearnih elektrana prema vrsti reaktora. Opisan je utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš i vrste nuklearnog otpada koje elektrane proizvode. Postupak zbrinjavanja radioaktivnog otpada i utjecaj njegovog dugotrajnog dubinskog skladištenja je razmotren. Sigurnost nuklearnih elektrana i svi njeni sigurnosni sustavi su nabrojani i objašnjeni. Uz fizičke zaštitne barijere, opisane su i zaštitne mjere kojima se osigurava njihova djelotvornost. Na primjeru Westinghouse AP1000 nuklearne elektrane prikazan je moderni pasivni sigurnosni sustav nuklearnih elektrana. U zadnjem dijelu ovog rada prikazana je metoda proračuna nivelirane cijene električne energije. Proračun je proveden za četiri različite tehnologije proizvodnje električne energije: nuklearne elektrane, elektrane na ugljen, kopnene vjetroelektrane i krovnih solarnih panela. Rezultati proračuna pokazali su vjetroelektrane kao najpovoljniji elektroenergetski objekt.

Ključne riječi: nuklearne elektrane, sigurnost nuklearnih elektrana, utjecaj na okoliš nuklearnih elektrana, nivelirana cijena električne energije.

SUMMARY

In this study current nuclear power plants situation in the world was examined. In the beginning, an overview of existing plants is given but also of plants in construction. In addition, a list of nuclear power plant types is given, divided by type of reactors. The effect nuclear power plants have on the environment and also the forms of waste they produce were described. Radioactive waste treatment, disposal and the effects of long-term depth storage are discussed. Safety of nuclear power plants and all its safety systems are explained. Alongside physical protection barriers, safeguard measures that secure their efficiency are described. A modern passive security system of nuclear power plants is illustrated on the Westinghouse AP1000 nuclear power plant. In the final part of the study the methodology of levelized cost of electricity calculation is explained. The calculation is conducted on four different electricity generation technologies: nuclear power plant, coal power plant, onshore wind farm and rooftop solar PV. The result of the calculation indicates the onshore wind farm to be the most cost effective electric power facility.

Key words: nuclear power plants, safety of nuclear power plants, nuclear power plants environment impact, levelized cost of electricity

1. UVOD

Potreba za energijom u svijetu neprestano raste. Električna energija je najkorisniji oblik energije zbog mogućnosti jednostavnog pretvaranja u ostale oblike energije. Ukupna svjetska proizvodnja električne energije u 2012. godini je iznosila 21 532 TWh, od čega je 2 344 TWh električne energije proizvedeno u nuklearnim elektranama, odnosno 11 % [1]. Na razini Europske unije u nuklearnim elektranama je proizvedeno čak 24,1 % električne energije u 2012. godini [1]. Kako bi ostvarila svoje ciljeve smanjenja emisije ugljičnog dioksida (CO_2) na prihvatljive razine, EU uz korištenje obnovljivih izvora energije mora imati i stalan, ne intermitentan izvor električne energije. Nuklearna energija i nuklearne elektrane se pokazuju kao jedno od mogućih rješenja ovog problema. Uz to što imaju mogućnost raditi na godišnjem punom opterećenju od 85 %, za vrijeme proizvodnje električne energije ne emitiraju CO_2 ili ostale stakleničke plinove.

Unatoč nultoj emisiji stakleničkih plinova tijekom proizvodnje, nuklearne elektrane imaju negativan utjecaj na okoliš. Nuklearni otpad, koji se sastoji od istrošenog goriva, opreme i naposljetku dekomisije cijele nuklearne elektrane, predstavljaju problem. U nastavku ovog rada razrađena je problematika posljedica iskorištavanja nuklearne energije na okoliš. Objašnjena je procedura skladištenja visoko-radioaktivnog otpada koji, kako bi zadovoljio sve sigurnosne standarde, mora biti sigurno skladišten narednih minimalno 100 000 godina.

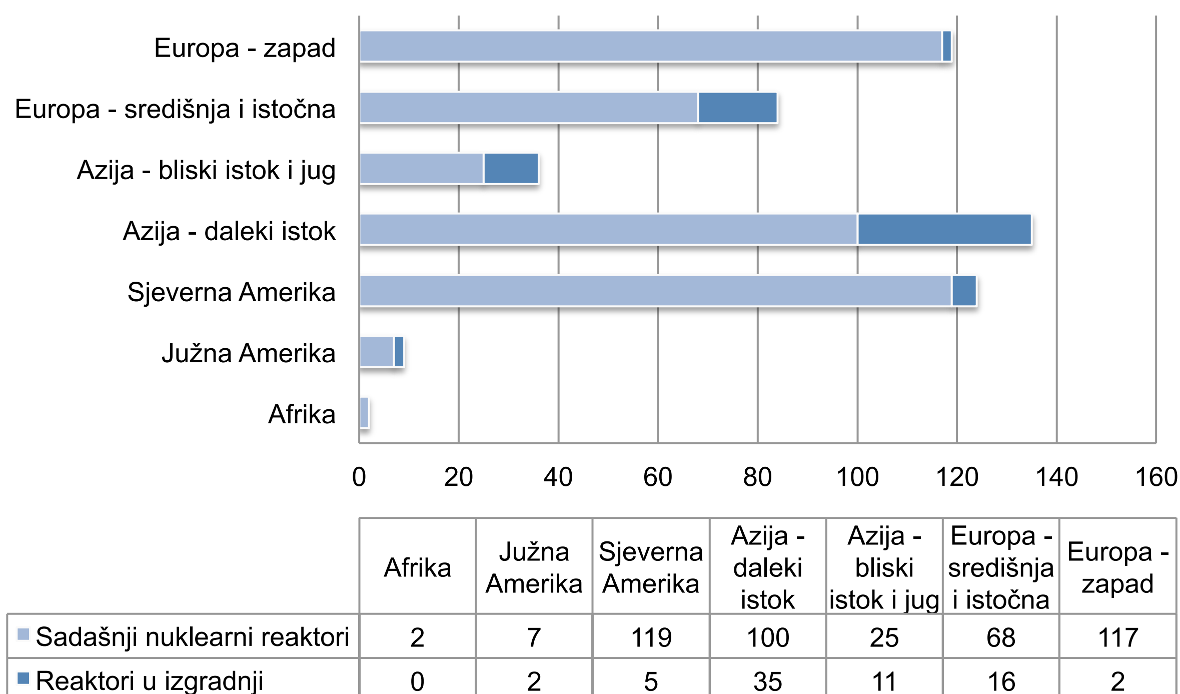
Nakon ožujka 2011. godine, odnosno nesreće nuklearne elektrane u Fukushimi, budućnost nuklearnih elektrana postala je neizvjesna. Strah od nuklearnih elektrana diljem svijeta je porastao, a time je smanjena njihova društvena prihvatljivost. Međutim brojne studije ukazuju na višestruko veću opasnost tehnologija temeljenih na fosilnim gorivima od nuklearne energije [2]. Koristeći podatke dosadašnje proizvodnje električne energije, proračunato je kako je nuklearna energija do 2013. godine spriječila otprilike 1,84 milijuna smrti uzrokovanih zagađenim zrakom i emisiju oko 64 Gt CO_2 ekvivalenta koji bi nastali spaljivanjem fosilnih goriva. U 4. poglavlju prikazani su svi sigurnosni elementi današnjih nuklearnih elektrana koji osiguravaju njenu izuzetnu sigurnost. Povećanje razine sigurnosti nuklearnih elektrana nužno je kako bi se poboljšalo njihovo viđenje u javnosti.

Ekonomska isplativost je, uz sigurnost i ekološku prihvatljivost, jedan od najvažnijih parametara za odabir elektroenergetskog objekta. Nivelirana cijena električne energije jedna je od mogućih metoda usporedbe ekonomskih čimbenika pojedinih izvora energije. Metodologija proračuna i izračun nivelirane cijene električne energije za nuklearnu elektranu, elektranu na ugljen, kopnenu vjetroelektranu i krovne solarne panele prikazani su u 5. poglavlju.

2. PREGLED IZGRADNJE NUKLEARNIH ELEKTRANA

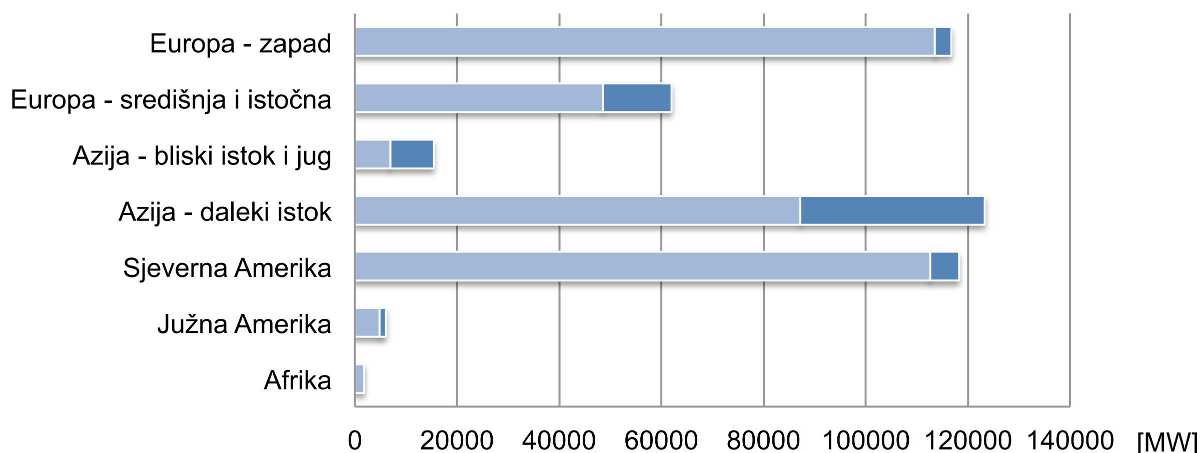
2.1. Nuklearne elektrane u svijetu

Trenutno u svijetu postoji 438 nuklearnih reaktora, od toga ih je najviše u Europi (185) i u Sjevernoj Americi (119). Ukupna instalirana snaga tih reaktora je 375,5 GW [3]. Na Slici 1. i Slici 2. dan je pregled postojećih nuklearnih reaktora u svijetu, trenutna izgradnja novih reaktora i njihova ukupna snaga prema svjetskim regijama. Kao što je vidljivo iz slike trenutno je najviše reaktora u izgradnji u Aziji, točnije na dalekom istoku, njih 35.



	Afrika	Južna Amerika	Sjeverna Amerika	Azija - daleki istok	Azija - bliski istok i jug	Europa - središnja i istočna	Europa - zapad
Sadašnji nuklearni reaktori	2	7	119	100	25	68	117
Reaktori u izgradnji	0	2	5	35	11	16	2

Slika 1. Broj nuklearnih reaktora u svijetu - prema regijama [3] [4]



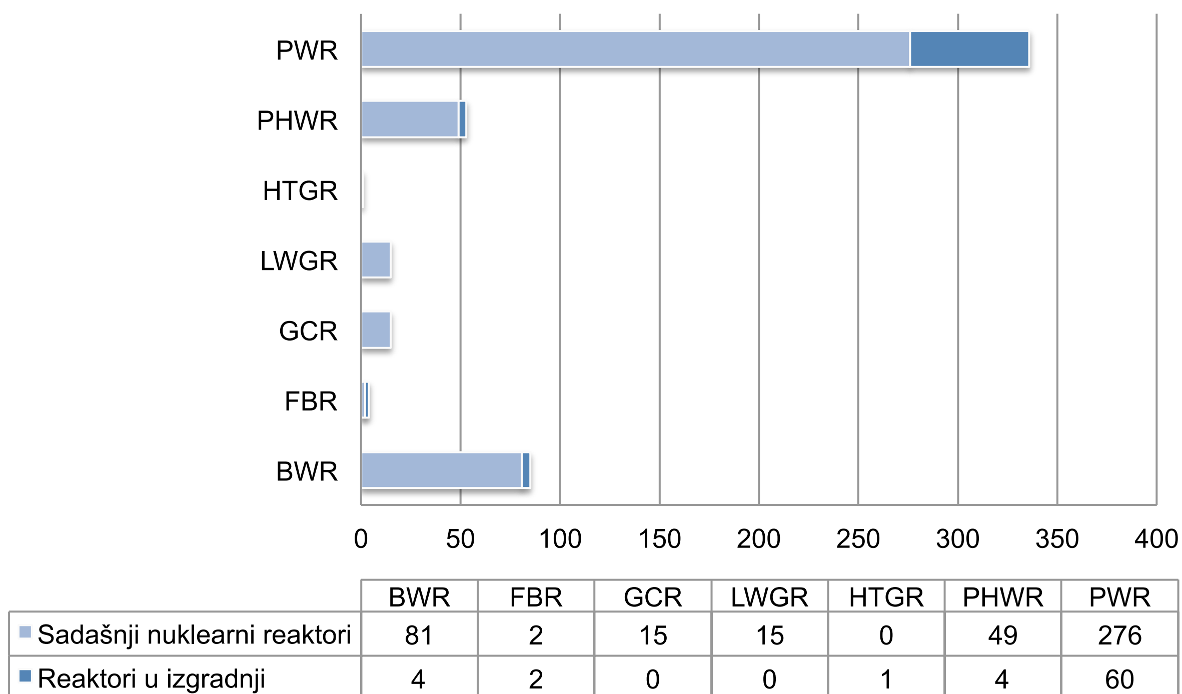
Slika 2. Snaga nuklearnih reaktora u svijetu - prema regijama [3] [4]

2.2. Vrste nuklearnih reaktora

Reaktorske sustave možemo klasificirati prema vrstama rashladnih sustava na reaktore hlađene vodom pod tlakom, kipućom vodom, plinom ili one hlađene tekućim metalima. Trenutno najrasprostranjeniji reaktorski sustav je PWR ("Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor") reaktor hlađen, ali i moderiran običnom vodom pod tlakom. Ova vrsta reaktora prvotno je osmišljena za uporabu u nuklearnim podmornicama zbog svoje kompaktnosti, a tek kasnije je započelo korištenje u nuklearnim elektranama. Uz podjelu prema vrstama rashladnih sustava, reaktorski sustavi se dijele prema korištenim moderatorima pa tako postoje oni moderirani običnom vodom, teškom vodom, grafitom i brzi oplodni reaktori bez moderatora. Prema tome, postojeće i reaktore u izgradnji možemo klasificirati na sljedeći način:

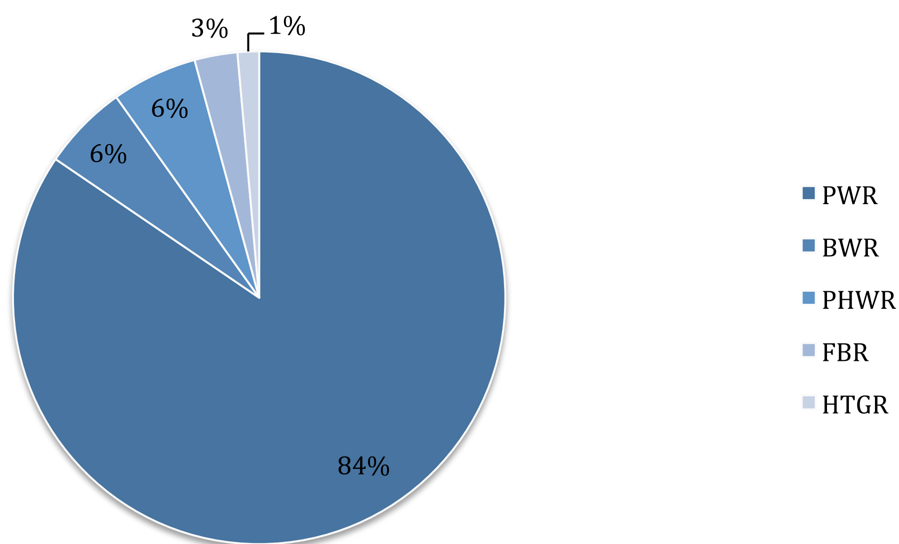
- PWR - Reaktor hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom ("Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor")
- BWR - Reaktor hlađen i moderiran običnom kipućom vodom ("Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor")
- PHWR - Reaktor hlađen i moderiran teškom vodom pod tlakom ("Pressurized Heavy-Water-Moderated and Cooled Reactor")
- HTGR - Reaktor hlađen plinom s visokim temperaturama u jezgri ("High-Temperature Gas-Cooled Reactor")
- LWGR - Reaktor hlađen običnom kipućom vodom i moderiran grafitom ("Light-Water-Cooled, Graphite-Moderated Reactor")
- GCR - Reaktor hlađen plinom i moderiran grafitom ("Gas-Cooled, Graphite-Moderated Reactor")
- FBR - Brzi oplodni reaktor ("Fast Breeder Reactor")

Na Slici 3. dan je pregled reaktora u svijetu prema vrsti. Trenutno je u svijetu u pogonu 276 reaktora tipa PWR, što je čak 63 % od ukupnog broja reaktora. Zajedno s BWR i PHWR reaktorima, navedena 3 tipa obuhvaćaju 93 % svjetskih reaktora. BWR se razlikuje od PWR po korištenju kipuće obične vode, a PHWR po korištenju teške vode pod tlakom. Iz Slike 4. jasno je vidljivo kako je PWR tehnologija još uvijek najkonkurentnija uz 60 novih nuklearnih reaktora tog tipa u izgradnji.



	BWR	FBR	GCR	LWGR	HTGR	PHWR	PWR
Sadašnji nuklearni reaktori	81	2	15	15	0	49	276
Reaktori u izgradnji	4	2	0	0	1	4	60

Slika 3. Broj nuklearnih reaktora u svijetu - prema vrsti reaktora [5] [6]



Slika 4. Vrste reaktora trenutno u izgradnji [6]

3. ANALIZA UTJECAJA NUKLEARNIH ELEKTRANA NA OKOLIŠ

3.1. Utjecaj elektrana na okoliš

Većina ljudskih aktivnosti u modernom civiliziranom društvu ima utjecaj na okoliš, od industrije, transporta, građevine, poljoprivrede, turizma i telekomunikacija, pa tako i energetika. Svi tipovi elektrana, uključujući i one na obnovljive izvore energije, kao i cjelokupna infrastruktura elektroenergetskog sustava (transformatorske stanice, prijenos električne energije) imaju nepovoljan utjecaj na okoliš.

Uz kvalitativnu analizu utjecaja na prirodni okoliš i društvo potrebno je i kvantitativno izraziti taj utjecaj. Kvantificiranje je omogućeno uvođenjem pojma eksternih troškova elektroenergetskih objekata, njima pripadajuće elektroenergetske infrastrukture i transporta. Analiza se provodi na cijelom procesu dobivanja energije, od iskopa i transporta goriva, preko gradnje i pogona elektrane do skladištenja otpada.

Čimbenici o kojima ovise eksterni troškovi elektrane su: prizemna koncentracija krutih čestica i aerosola (koji nastaju kao posljedica emisija SO_2 i NO_x), meteorološki uvjeti za raspršenje emisija, gustoća populacije i zahvaćeno područje. Također, ovisno o načinu analize, za kvantitativnu procjenu eksternog troška koristi se statistička vrijednost ljudskog života (Value of Statistical Life - VSL) ili vrijednost godine izgubljenog života (Value of Year of Life Lost v_{yoll}). Računska vrijednost statističkog života za EU je reda veličine 3 milijuna eura te ovisi o ekonomskoj snazi pojedine zemlje (približno je proporcionalna s njezinim BDP-om) [7].

Utjecaj emisije CO_2 na okoliš i njegovo kvantificiranje, u obliku eksternog troška elektrane koja ga proizvodi, jako je nesigurno s obzirom da se radi o globalnoj šteti uzrokovanoj tom emisijom. Nemogućnost točnog određivanja posljedica emisije ugljičnog dioksida u atmosferu, njen utjecaj na globalno zatopljenje i općenito ocjena štete klimatskih promjena također unosi nesigurnost. Uzevši u obzir tako veliku mjernu nesigurnost, moguće je napraviti i studije utjecaja CO_2 na okoliš koje bi dokazale njihov neznatan utjecaj. Pojedine interesne grupe u području energetike potiču takve studije i na taj način pokušavaju smanjiti strah javnosti od tehnologija s visokim emisijama ugljičnog dioksida.

U Tablici 1. prikazani su rezultati studije iz 2003. godine o eksternim troškovima određenih vrsta elektrana u Njemačkoj. Redoslijed nepovoljnosti navedenih energijskih tehnologija prema štetnosti na okoliš je:

1. Termoelektrane na ugljen

2. Termoelektrane na plin

3. Elektrane na obnovljive izvore energije i nuklearne elektrane

s omjerom nepovoljnosti otprilike 10:5:1. Takav odnos veličina također je prihvaćen i od šire javnosti, osim za nuklearne elektrane. Kod nuklearnih elektrana na stav javnosti uglavnom utječe mogućnost katastrofalnih nezgoda, dok je kod ostalih elektrana stav oblikovan utjecajem normalnog pogona elektrane na okoliš.

Tablica 1. Eksterni troškovi elektrana [7]

Vrsta elektrane	**Elektrana na ugljen**	**Elektrana na plin u kombiniranom ciklusu**	**Hidroelektrana**	**Vjetrena elektrana**	**Nuklearna elektrana**
Eksterni trošak zbog emisija CO_2 [eurocenti/kWh]	1,60	0,73	0,03	0,04	0,03
Eksterni trošak zbog emisija krutih čestica i aerosola, radioaktivnih tvari i buke [eurocenti/kWh]	0,95	0,39	0,08	0,12	0,17
Ukupni eksterni trošak [eurocenti/kWh]	2,55	1,12	0,11	0,16	0,20

3.2. Radioaktivni otpad

Za razliku od ostalih načina proizvodnje električne energije, nuklearne elektrane su jedine koje u potpunosti preuzimaju odgovornost za sav otpad koji proizvode i u potpunosti financiraju njegovo zbrinjavanje, od njegovog nastanka do prestanka opasnosti zbog zračenja.

Nuklearni otpad sastoji se od više vrsta otpada, podijeljenih prema razini radioaktivnosti. Visoko-radioaktivni otpad ($>5 \times 10^{14}$ Bq/m^3) nastao kao produkt rada nuklearne elektrane je po količini samo 3 % ukupnog otpada. To su uglavnom ostatci iskorištenog nuklearnog goriva, a sadrže 95 % radioaktivnosti od ukupnog otpada kao što je prikazano u Tablici 2. Njihova radioaktivnost traje više stoljeća te se spremaju na posebna odlagališta za visoko-radioaktivni otpad.

Tablica 2. Udio nisko, srednje i visoko-radioaktivnog otpada iz nuklearne elektrane [8]

Vrsta radioaktivnog otpada	**Volumni udio**	**Udio radioaktivnosti**
Nisko i srednje-radioaktivni otpad	95 %	1 %
Visoko-radioaktivni otpad	5 %	99 %

Odlaganje radioaktivnog otpada provodi se na različite načine. Nisko i srednje-radioaktivni otpad odlaže se površinski, tunelski ili u napuštenim rudnicima. Kod površinskog odlaganja koriste se metalne posude za otpad koje se spremaju u armirano-betonskim kontejnerima na armirano-betonsku podlogu sa sustavom za odvod procjednih voda. Takvi kontejneri oblažu se armirano-betonskim zidovima i prekrivaju s par slojeva prirodnih materijala kako bi se spriječio prodor oborinskih voda, odnosno kako bi se postigla dobra hidro-izolacijska svojstva. Tunelski se otpad odlaže u horizontalnim tunelima izbušenim u granitnim slojevima, uz istu proceduru s metalnim posudama i armirano-betonskim oblogama uz zalijevanje betonom nakon popunjenja tunela.

Prije odlaganja visoko-radioaktivnog otpada, otpad se mora hladiti u posebnim bazenskim postrojenjima. Mokrim se skladištenjem ispod površine vode osigurava hlađenje goriva tijekom razdoblja od 5-10 godina. Takvo skladištenje se obično provodi u blizini nuklearne elektrane koja je i proizvela otpad. Nakon hlađenja iskorišteno nuklearno gorivo odlaže se u dubokim geološkim formacijama. Konačno odlaganje mora osigurati udovoljavanje svim zakonskim i regulacijskim zahtjevima u razdoblju od 10000 godina, u čemu najveću ulogu ima stabilnost geoloških formacija. Za odlaganje su najprikladniji granit, bazalt, glina i solne formacije koji imaju vrlo dugotrajnu stabilnost od preko milijun godina.

Nisko i srednje-radioaktivni otpad ne predstavlja problem za skladištenje, te je gospodarenje takvim otpadom danas riješeno na zadovoljavajući način. Skladištenje visoko-radioaktivnog otpada trenutno je u fazi istraživanja i razvoja. Pored usavršavanja tehnologije odlaganja i razvoja otpornih materijala za spremnike, za dugotrajno odlaganje istrošenog nuklearnog goriva problem predstavlja pronalazak dovoljno stabilnih geoloških formacija za njegovo odlaganje.

Dekomisijski otpad nuklearnih elektrana problematičan je za odlaganje zbog velike količine. Dekomisija ili razgradnja nuklearne elektrane je skup mjera, postupaka i aktivnosti koje se provode nakon trajne obustave rada reaktora s ciljem da se zaostala radioaktivnost smanji na najmanju moguću mjeru te da se lokacija nuklearne elektrane osposobi za ponovno korištenje u istu ili drugu svrhu. Tri su glavna segmenta dekomisije nuklearnih elektrana: postupak dekontaminacije, čuvanja i postupak imobilizacije na lokaciji. Prvi postupak, postupak dekontaminacije i brze razgradnje (eng. *decontamination*) traje do 15 godina, dok postupak čuvanja i odgođene razgradnje (eng. *safe storage*) traje 30 do 100 godina. Posljednji postupak, imobilizacija na lokaciji (eng. *entombment*) traje više od 100 godina.

Postupak dekomisije nuklearne elektrane ovisi o količini dekomisijskog otpada, odnosno o sadržaju pojedinih radioaktivnih izotopa, i njihovom vremenu poluraspada. U Tablici 3. prikazana su vremena poluraspada glavnih zaostalih izotopa dekomisijskog otpada. U Tablici 4. dani su rezultati preliminarne analize dekomisije NE Krško.

Tablica 3. Vremena poluraspada glavnih zaostalih radioaktivnih izotopa (radionuklida) [8]

Tip radionuklida	Vrijeme poluraspada
Fe-55	2,7 godina
Co-60	5,3 godina
Ni-63	100 godina
Ni-59	75 000 godina
Nb-94	20 000 godina

Tablica 4. Preliminarne analize za razgradnju NE Krško [8]

Scenarij razgradnje	Trajanje razgradnje	Količina dekomisijskog radioaktivnog materijala
Brza razgradnja	15 godina	oko 18 700 m^3
Odgođena razgradnja	100 godina	oko 1 000 m^3
Imobilizacija na lokaciji	160 godina	oko 2 500 m^3

3.3. Rukovanje radioaktivnim otpadom u nuklearnoj elektrani

ALARA princip ("As Low As Reasonably Achievable") koristi se kao strategija rukovanja radioaktivnim materijalima i ispusta radioaktivnog otpada u nuklearnoj elektrani [9] [10]. To je sigurnosni princip za minimiziranje doza i otpuštanja zračenja radioaktivnih materijala kroz poduzimanje svih razumnih mjera odnosno smanjivanje zračenja na toliko malu razinu koliku je racionalno moguće postići. ALARA princip je također reguliran i propisima.

Radom PWR tipa nuklearne elektrane radioaktivne otpadne tvari nastaju u kapljevitom i plinovitom stanju. Kako bi se olakšalo rukovanje i spremanje otpada, on se prerađuje u što koncentriraniji i što stabilniji oblik. Za uspješno dugoročno spremanje potrebno je prevesti sav otpad u kruto stanje. Sustav za održavanje čistoće rashladnog sredstva reaktora (opisan u poglavlju 4.2.1.3) sadrži smole za čišćenje vode iz primarnog kruga reaktora. Te smole su dio krutog otpada. Voda ispuštena iz primarnog kruga radi uzimanja uzorka ili propuštanja na isparivačima se potpuno isparuje. Tako se dobiva kruti ostatak, talog, koji se tretira i sprema kao kruti radioaktivni otpad.

Talozi isparivača miješaju se prije skladištenja i punjenja u bačve sa specijalnim cementom kako bi nakon skrućivanja činili kompaktnu smjesu. Istrošene izmjenjivačke smole i filteri, kontaminirana odjeća, krpe i plastika također se pune u bačve s ugrađenim unutarnjim

betonskim štitom. Većinu krutog otpada čine talozi isparivača. Nuklearna elektrana PWR tipa, snage 630 MW (npr. NE Krško) godišnje proizvodi otprilike 300 m^3 ovog nisko i srednje-radioaktivnog otpada.

3.4. Dugoročni utjecaj dubinskog skladištenja otpada

S obzirom da visoko-radioaktivni otpad skladišten u dubokim geološkim formacijama zrači u razdoblju od desetak tisuća godina od odlaganja, teško je eksperimentalno odrediti dugoročni utjecaj radioaktivnih nuklida na prirodnu okolinu. Međutim, fenomen rudnika urana Oklo u Gabonu [9] znanstvenicima je poslužio za analizu tog utjecaja.

Rudnik Oklo sadrži rudu visoke koncentracije urana, ali je jedini u svijetu kod kojeg je udio U^{235} prirodnog fisijskog izotopa niži od 0,7 %. Prema tome je ruda iz tog rudnika po svojem sastavu izotopa urana slična istrošenom nuklearnom gorivu iz prirodnog urana. Znanstvenici su istražujući taj rudnik zaključili kako je prije 2 milijarde godina prirodni uran s tog područja sadržavao 3,5 % U^{235}. Zbog postojanja prirodnih podzemnih voda u njemu su se razvili uvjeti za samoodrživu lančanu fisijsku reakciju. Ta reakcija je trajala uz prekide do 500000 godina. Analizira okolnog tla pokazala je kako su fisijski produkti i proizvodi njihovog raspada imali nisku razinu prodiranja, te je na taj način dokazana mogućnost korištenja dubinskog skladištenja za dugoročno odlaganje visoko-radioaktivnog otpada. Ovim prirodnim eksperimentom pokazano je da se radioaktivni nuklidi nakon dugog razdoblja zadržavaju u blizini mjesta nastanka te nemaju veći utjecaj na širi okoliš geološke formacije dubinskog skladišta.

4. SIGURNOST PWR TIPA NUKLEARNIH ELEKTRANA

4.1. Principi sigurnosnih mjera u nuklearnim elektranama

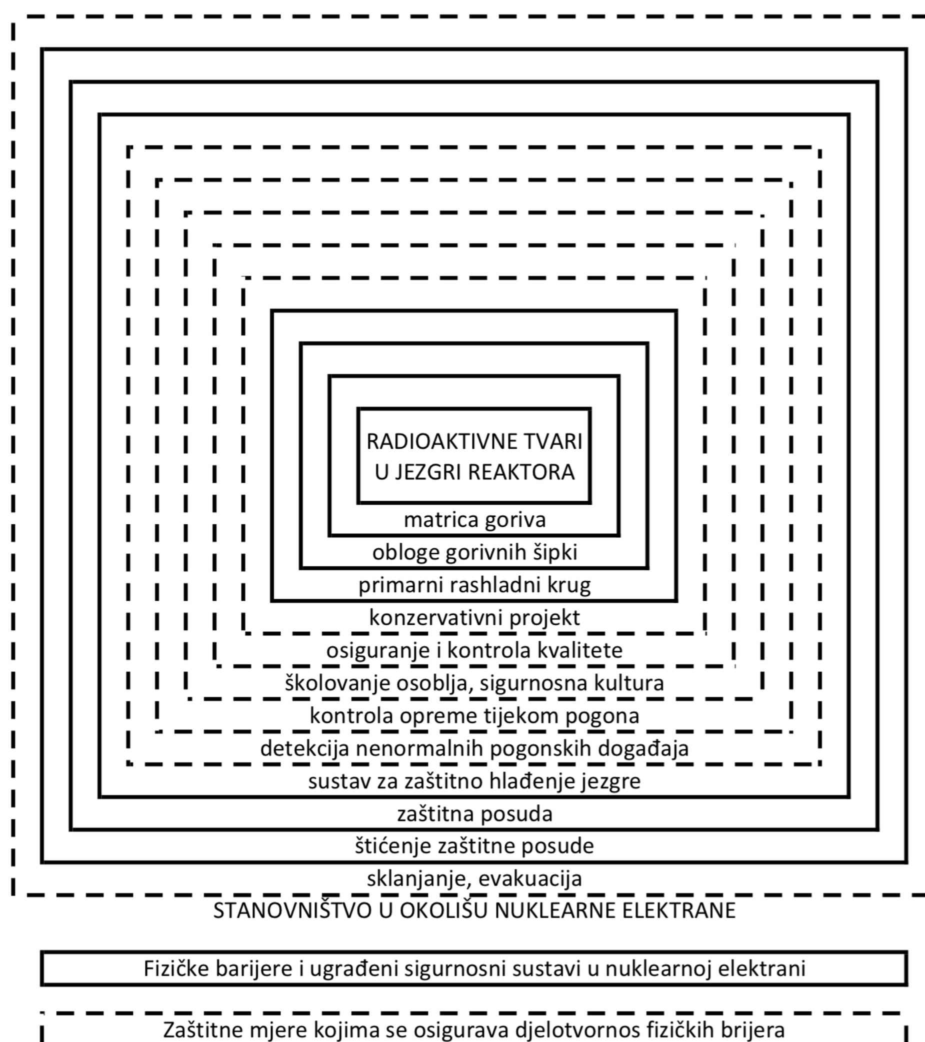
Rad nuklearnih elektrana donosi i opasnost od katastrofalnih posljedica u slučaju nezgode. Primjer jedne takve nezgode je Černobilska nesreća, koja se dogodila 1986. godine u bivšoj Sovjetskoj Ukrajini. Dana 26. travnja 1986. godine, kombinacijom nesigurnog dizajna sovjetskog nuklearnog reaktora te ljudskom pogreškom, uzrokovana je eksplozija koja je uništila jedan od četiri reaktora Černobilske nuklearne elektrane. Računa se da je posljedice proširenog zračenja te katastrofe osjetilo oko 5 milijuna ljudi, a zdravstveni problemi velikog broja ljudi prisutni su i dan danas. Tu su još i problemi zbrinjavanja velike količine otpada i sačuvanja okoliša u neposrednoj blizini elektrane.

Kao posljedica Černobilske katastrofe, nesreće na Otoku Tri Milje i u nuklearnoj elektrani Fukushima, u društvu danas postoji visoka razina straha od nuklearnih elektrana i općenito nuklearne tehnologije. Kako bi uz taj strah korištenje nuklearne tehnologije bilo društveno prihvatljivo i kako bi se broj nezgoda i posljedice nezgoda smanjile, nuklearne elektrane grade se prema vrlo visokim standardima. Uz razne konstrukcijske mjere, za siguran rad nuklearnih elektrana potrebna su i razna ograničenja i strogo definirane mjere rada tijekom pogona kako bi svi sigurnosni aspekti bili zadovoljeni.

Primarni cilj svih sigurnosnih mjera poduzetih kod gradnje nuklearnih elektrana je zaštita života i zdravlja ljudi, operatera i stanovništva okolice elektrane, ali također i zaštita okoliša. Kako rad nuklearne elektrane podrazumijeva visoke količine radioaktivnosti unutar jezgre nuklearnog reaktora, koja u slučaju nezgode može biti ispuštena u okoliš, cilj je putem što više mjera smanjiti mogućnost takvog događaja. Princip projektiranja i vođenja nuklearnih elektrana je takozvana "obrana po dubini" prikazana shematski na Slici 5. Ta filozofija sastoji se od poduzimanja brojnih zaštitnih barijera tako da u slučaju otkazivanja jedne, ona sljedeća automatski održava sigurnost. Poduzete sigurnosne mjere sastoje se od raznih fizičkih barijera i sustava ugrađenih unutar elektrane, ali i od zaštitnih mjera kojima se osigurava djelotvornost tih barijera. [9]

4.2. Barijere u PWR tipu nuklearnih elektrana

Danas najrašireniji tip nuklearnog reaktora je reaktor hlađen vodom pod tlakom (PWR) s preko 270 takvih reaktora u pogonu od ukupno 438 nuklearnih reaktora u svijetu. Također, od 71 reaktora koji su trenutno u izgradnji, 60 je PWR tipa. PWR reaktori koriste vodu pod visokim tlakom za hlađenje reaktora kako bi se izbjeglo ključanje vode (zbog boljeg moderiranja i zbog znatno boljeg prijelaza topline nego u području vrenja vode).



Slika 5. Barijere između radioaktivnih tvari u jezgri reaktora i okolnog stanovništva [9]

4.2.1. Fizičke barijere

4.2.1.1. Matrica nuklearnog goriva

Nuklearno gorivo obloženo je sinteriranim uranovim oksidom koji je matrica nuklearnog goriva u kojem se odvijaju fisijske reakcije. Prosječan put fisijskih produkata nastalih lančanom reakcijom u gorivu je relativno malen (do 100 mm) tako da većina produkata ostaje u gorivu. Ujedno i 95 % topline proizvedene fisijom ostaje u gorivu. Zadatak matrice goriva je dakle da zadrži fisijske produkte, a sa sigurnosnog aspekta najvažnije je zadržavanje plinovitih i lako hlapljivih produkata (izotopi joda, cezija, kriptona i ksenona).

Učinkovitost prve fizičke barijere, odnosno matrice goriva, ovisi o sposobnosti zadržavanja fisijskih produkata koja se smanjuje kako temperatura raste. Pri temperaturama nižim od 1950 K utvrđeno je kako manje od 1 % plinovitih fisijskih produkata bude ispušteno iz matrice. U blizini temperature taljenja uranovog oksida (3030 K) praktički svi plinoviti fisijski produkti izlaze iz materijala goriva.

4.2.1.2. Obloga gorivnog elementa

Obloga matrice gorivih elemenata izrađena je iz tankostjenih cijevi cirkonijeve legure (komercijalnog naziva zircalloy), a katkada, ali puno rjeđe, od nehrđajućeg čelika. Kod visokotemperaturnih reaktora obloga može biti i grafitna.

Glavni zahtjev na obloge matrice goriva je efikasno zadržavanje fisijskih produkata. Uz to obloga mora osigurati i dobar prijelaz topline na rashladni medij (u slučaju PWR reaktora to je obična voda). Kako bi taj zahtjev bio ispunjen, cijevi obloge izrađuju se s maksimalno dopuštenom debljinom stijenke od 0,6 mm. Uz strogu kontrolu izrade zaštitnih obloga, kako bi se spriječile pukotine koje bi ispuštale fisijske produkte, potrebni su oprez i zaštita od njihovog pregrijavanja koje bi za posljedicu imalo pucanje obloga. Pojava filmskog isparavanja na stijenci obloge, uzrokovanog kritičnim toplinskim tokom, izrazito je opasna za integritet ove druge fizičke barijere.

4.2.1.3. Primarni rashladni krug

Kako rashladni fluid, koji je u slučaju PWR tipa elektrane obična voda (ujedno i moderator), unutar postrojenja cirkulira u zatvorenom krugu, radioaktivne tvari ispuštene kroz obloge ostaju u primarnom krugu. Primarni rashladni krug tako preuzima ulogu treće fizičke barijere. Akumulacija radioaktivnih tvari sprječava se sustavom za održavanje čistoće rashladnog sredstva reaktora.

Kvarom, odnosno gubitkom integriteta primarnog kruga, radioaktivne tvari mogu prodrijeti u zaštitnu posudu postrojenja. Integritet primarnog kruga ovisi o mehaničkim i termičkim naprezanjima komponenata, ali i o koroziji i eroziji materijala.

4.2.1.4. Zaštitna posuda

Zaštitna posuda je četvrta fizička barijera i zadatak joj je zaštita okoline u slučaju propuštanja primarnog kruga. U slučaju gubitka prve i druge barijere (matrice i obloge nuklearnog goriva) radioaktivnost primarnog kruga je izrazito velika, u čemu zaštitna posuda ima bitnu ulogu. Ekstremni slučaj, u kojem zaštitna posuda preuzima tu ulogu je taljenje jezgre.

Ukoliko su matrice i obloge goriva očuvane, ali ipak dođe do curenja primarnog rashladnog kruga, dolazi do nagle ekspanzije fluida rashladnog sustava te ispunjavanje prostora zaštitne posude radioaktivnom parom. Zaštitna posuda projektirana je za tlak koji može nastati unutar nje u tom slučaju. Nastali tlak je obično u granicama od 0.4 do 0.5 MPa. Bez postojanja zaštitne posude radioaktivna para ne bi imala barijeru za istjecanje u okoliš.

Integritet zaštitne posude ovisi o mehaničkim naprezanjima materijala zbog vanjskih i unutarnjih utjecaja. Odnos tlaka u unutrašnjosti (koji svakako ovisi o unutarnjoj temperaturi i raste dovođenjem topline iz reaktora) i tlaka za koji je ona projektirana najznačajniji je za integritet zaštitne posude. Bitno značenje za funkciju zaštitne posude nakon kvara ima

zatvaranje (izolacija) svih ulaznih i izlaznih cjevovoda koji nisu vezani za sustav zaštitnog hlađenja jezgre. Ako se oni ne zatvore može doći do obilaska zaštitne posude tim cjevovodima.

4.2.2. Ugrađeni sigurnosni sustavi

4.2.2.1. Sustav za zaštitno hlađenje jezgre reaktora

Funkcija zaštitnog hlađenja jezgre svodi se najčešće na zaštitu prvih dviju fizičkih barijera (matrice goriva i obloge gorivnih elemenata) u slučaju gubitka treće barijere (integritet primarnog kruga). Uloga zaštitnog hlađenja jezgre je i šira od toga jer osigurava jezgru i onda kada se poremeti njeno hlađenje iako integritet primarnog kruga nije narušen.

Sustav za zaštitno hlađenje jezgre projektira se uz poštivanje veoma konzervativnih pretpostavki te uz strogu primjenu propisa kontrole i osiguranja kvalitete. Funkcija zaštitnog hlađenja jezgre mora se osigurati ugradnjom za tu funkciju posebno provjerene opreme, osiguranjem višestrukih komponenata opreme za istu funkciju, osiguranjem višestrukog napajanja i odvojenog fizičkog smještaja komponenata opreme.

Djelovanje sustava za zaštitno hlađenje jezgre treba nastaviti i nakon svladavanja posljedice kvara dugoročnim hlađenjem ugašenog reaktora.

4.2.2.2. Sustav za odvod ostatne topline

Po prestanku lančane reakcije fisije toplina se i dalje proizvodi zbog fisije zakašnjelih neutrona, raspada fisijskih produkata i unutrašnje topline goriva. Toplina se, također, proizvodi i jednu do dvije sekunde koje su potrebne dok šipke za brzu obustavu padnu.

Reaktor se hladi tako da se ne oštete obloge gorivih elemenata. Prva četiri sata reaktor se hladi preko generatora pare. Nakon toga se uključuje u rad sustav za odvod zaostale topline koji se dimenzionira za odvođenje otprilike 0,8 % pune snage. Sustav je priključen paralelno s osnovnim rashladnim krugom. U pravilu ima više identičnih rashladnih krugova od kojih je samo jedan potpuno dovoljan.

Sustav za odvod ostatne topline također služi za: punjenje i pražnjenje bazena za odzračeno gorivo, potapanje jezgre pumpanjem borirane vode, recirkulaciju borirane vode kroz jezgru priključkom usisa pumpe na dno zaštitne posude.

4.2.2.3. Sustav za zaštitu zaštitne posude

Zaštita posude ponajprije je vezana uz ograničenje porasta unutarnjeg tlaka. Do porasta tlaka može doći nakon taljenja jezgre, u kojem slučaju rastaljena masa nuklearnog goriva, koja je prethodno prodrla kroz reaktorsku posudu, zagrijava njezinu unutrašnjost.

Osim izravnog zagrijavanja, povećanju tlaka pridonose i kemijske reakcije pri visokim temperaturama kao što su oksidacija cirkonija i stvaranje vodika te kemijske reakcije između

betona i rastaljene jezgre. Pri interakciji betona i rastaljene jezgre nastaju plinovi (vodena para, vodik, ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, ...).

Unutarnje i vanjsko hlađenje zaštitne posude je mjera kojom se smanjuje tlak plinova u unutrašnjosti posude i time otklanja mogućnost njezinog loma zbog previsokog tlaka. Hlađenje se izvodi tako da se unutarnja toplina predaje rashladnoj vodi. Vanjsko hlađenje se može provoditi zrakom, ali kod novijih izvedbi reaktora postoji sustav tuširanja zaštitne posude vodom. Tuširanje se, također, može provesti boriranom vodom kako bi se neutralizirala radioaktivna para u slučaju propuštanja zaštitne posude.

Hvatač jezgre, kao sljedeća mjera zaštite, je veliki blok materijala otpornog na visoke temperature (grafit, oksid osiromašenog urana) ili specijalno projektirana rešetka koja se ugrađuje na dno reaktorske posude ili ispod nje. Ako se jezgra počinje taliti i rastaljena masa počne prodirati prema reaktorskoj posudi, ona tada pada u hvatač jezgre, čime se sprječava kontakt rastaljene jezgre i betona.

Kontrolirano katalitičko spaljivanje vodika nastalog u zaštitnoj posudi sprječava naglo povećanje unutarnjeg tlaka u slučaju eksplozije, do koje bi moglo doći ako se zbog povećanja koncentracije vodika dosegne eksplozivna mješavina plinova. Može se, također, provesti i kontrolirano ispuštanje plinova iz zaštitne posude kako bi se osiguralo ograničenje porasta unutarnjeg tlaka u zaštitnoj posudi kada on dosegne vrijednost koja može ugroziti njezin integritet. Budući da su ti plinovi radioaktivni, provodi se filtracija prije njihovog ispuštanja u okoliš.

4.2.3. Mjere za očuvanje djelotvornosti fizičkih barijera

4.2.3.1. Konzervativan projekt nuklearne elektrane

Konzervativan projekt je pojam kojim se određuje način projektiranja uz velike rezerve i pesimistične pretpostavke. Projekt komponenata u sustavu nuklearne elektrane polazi od materijala dobro poznatih svojstava za čija se naprezanja tijekom pogona uzimaju najnepovoljnije pretpostavke. Uz takve se pretpostavke osigurava još i dovoljna rezerva s obzirom na njihovu izdržljivost.

Svi sustavi i komponente bitni za sigurnost su višestruki. Njihovo napajanje energijom je osigurano s više strana i fizički su odvojeni (kako bi se izbjegla neraspoloživost zbog zajedničkog uzroka). Instrumenti i oprema, a posebno ventili, važni su za sigurnost te moraju kod kvara ostati u položaju koji podržava sigurnost postrojenja (tzv. *fail safe*).

Projektom predviđeni pogonski uvjeti reaktorske jezgre i komponenata opreme moraju osigurati toplinska i mehanička opterećenja koja ni u prijelaznim stanjima neće ugroziti njihov integritet.

Sustav instrumentacije i regulacije elektrane mora omogućiti operatorima pun uvid u njen rad i upravljanje u svim uvjetima. Višestruki mjerni i regulacijski kanali trebaju osigurati nadzor i upravljanje u uvjetima otkaza pojedinih mjernih i regulacijskih sustava. To se posebno odnosi na sustav za obustavu pogona reaktora koji mora biti u mogućnosti obustaviti reaktor na više neovisnih načina.

U elemente konzervativnog projekta možemo uvrstiti i izbor lokacije nuklearnog objekta. Lokacija mora osigurati uvjete (seizmika, poplave, ekstremni meteorološki uvjeti) koji neće ugroziti integritet objekta i njegovo vanjsko napajanje rashladnom vodom i električnom energijom, ali i osigurati lakše uvjete za zaštitu stanovništva ako dođe do nezgode (mala gustoća naseljenosti oko lokacije, pogodni uvjeti za provođenje plana evakuacije).

4.2.3.2. Osiguranje kvalitete u svim fazama realizacije objekta

Sustav kontrole i osiguranja kvalitete ima zadatak da nizom sustavnih mjera kroz izravnu kontrolu proizvoda (kontrola kvalitete) i ostvarivanjem administrativnog sustava koji sudionike primorava na poštivanje utvrđenih propisa i standarda kvalitete (osiguranje kvalitete) garantira da će kvaliteta projektnih radova, građevinskih radova, opreme i montaže biti u skladu s propisima i zahtjevima projekta.

Kada je riječ o opremi sigurnosne klase (tj. o opremi važnoj za nuklearnu sigurnost), mjere kontrole i osiguranje kvalitete obuhvaćaju sve faze izrade takve opreme, od osnovne sirovine, tehnološkog procesa i obrade materijala do sastavljanja i ispitivanja gotovog proizvoda, pakiranja, zaštite i transporta.

Cijeli sustav osiguranja kvalitete definiran je nacionalnim i međunarodnim propisima (kao što su primjerice propisi Međunarodne agencije za atomsku energiju). Sustav kontrole i osiguranja kvalitete svodi na minimum mogućnost grešaka u gradnji i pogonu nuklearnog energetskog postrojenja, posebno onih koje bi mogle negativno utjecati na sigurnost.

4.2.3.3. Propisano školovanje pogonskih kadrova i promocija sigurnosne kulture

Uloga pogonskog osoblja u sigurnom vođenju pogona nuklearne elektrane od primarnog je značenja. Zbog toga školovanje osoblja nuklearne elektrane ulazi u kategoriju aktivnosti koje su čvrsto povezane s nuklearnom sigurnošću. Način školovanja i kriteriji za stjecanje i održavanje kvalificiranosti pogonskog osoblja (posebno za operatere reaktora) definirani su propisima.

4.2.3.4. Sigurnosna kultura

Sigurnosna kultura je pojam prvi put uveden u dokumentu MAAE INSAG-3. Taj pojam određuje način ponašanja svih sudionika u ostvarivanju projekta nekog nuklearnog energetskog postrojenja (i graditelja i pogonskog osoblja), a ogleda se u njihovu istinskom prihvaćanju

važnosti sigurnosnih propisa i mjera kao i važnosti dosljednog poštivanja njihovog provođenja. Sigurnosna kultura pretpostavlja odgovarajuće shvaćanje i ponašanje cijelog pogonskog osoblja elektrane na svim razinama odgovornosti, koje se ogleda u davanju prioritetnog značenja pitanjima sigurnosti, bez obzira na eventualne ekonomske gubitke (npr. smanjena proizvodnja energije).

Sigurnosna kultura osoblja je bitna za siguran rad postrojenja jer pretpostavlja ne samo postojanje i poznavanje propisa za siguran rad elektrane već i njihovo dosljedno prihvaćanje i poštivanje. Sigurnosna kultura zajedno sa školovanjem kadrova temeljni su elementi za uspješno djelovanje tzv. ljudskog faktora u nuklearnoj elektrani.

4.2.3.5. Detekcija nenormalnih pogonskih događaja

Pažljiv i sustavan nadzor rada sustava nuklearne elektrane tijekom pogona i uočavanje svih nepravilnosti u opremi i sustavima jedna je od bitnih pretpostavki za sigurnost pogona. Djelovanje sustava nuklearne elektrane i ponašanje opreme tijekom pogona treba stalno pratiti i sustavno otklanjati sve uočene nedostatke. Na taj način se ispravljaju propusti i nedostatci prije opisanih zaštita fizičkih barijera, pa bismo tu mjeru mogli smatrati drugom razinom takve zaštite, u smislu principa zaštite po dubini.

4.2.3.6. Inspekcija opreme tijekom pogona nuklearne elektrane

Bez obzira na pažljiv i konzervativan projekt i odabir materijala, propisima je određena obveza da se struktura osnovnih materijala i zavarenih spojeva najbitnijih komponenata opreme primarnog kruga nuklearne elektrane (reaktorska posuda, parogeneratori, primarni cjevovodi) mora tijekom pogona u određenim vremenskim razmacima provjeravati metodama detekcije bez razaranja. Ova aktivnost, u literaturi poznata kao pogonska inspekcija, ima bitno značenje za zaštitu integriteta primarnog kruga (tj. za zaštitu treće fizičke barijere).

4.2.3.7. Zaštitne mjere u okolišu

Mjere koje uključuju izravnu zaštitu stanovništva u okolišu nuklearne elektrane možemo smatrati posljednjom barijerom u zaštiti od mogućeg štetnog djelovanja nuklearnog objekta. Ova zaštita stupa u funkciju ako otkažu sve opisane barijere koje čine sustav obrane po dubini.

Svaka nuklearna elektrana mora imati razrađen i uvježban plan zaštite okoline u slučaju nastanka ekstremne nezgode u kojoj bi došlo do većeg ispuštanja radioaktivnosti. Plan sadrži način obavještavanja, sklanjanja, zaštite i eventualno evakuacije okolnog stanovništva kako bi se broj povreda zbog radioaktivnosti sveo na minimum.

4.3. Westinghouse AP1000

U svrhu primjera sigurnosti PWR nuklearnih reaktora proučavat će se PWR nuklearni reaktor tvrtke Westinghouse AP1000 [11] [12]. Moderni reaktor ove tvrtke dizajniran je kako bi u

slučaju nezgode elektrana na pasivan način, bez sudjelovanja operatera, sigurno provelo gašenje reaktora. Kako ne bi ovisila o diesel generatorima i pumpama, u elektrani se postiže navedeno gašenje reaktora koristeći prirodne sile (gravitaciju, prirodnu cirkulaciju). Time se sprječava pregrijavanje jezgre i zaštitne posude.

Kako bi bila osigurana sigurnost na više razina moderni nuklearni reaktori konstruirani su tako da postoji ekstremno mala vjerojatnost štete jezgre reaktora i poplavljivanja, tlačenja i zagrijavanja zaštitne posude. Pažljiv odabir prikladnih materijala, kontrola kvalitete tijekom konstrukcije i izgradnje, visoko obučeni operatori i napredni sustav kontrole elektrane osiguravaju značajni faktor sigurnosti za rad nuklearne elektrane prije približavanja sigurnosnih granica. Uz navedeno također postoje i sljedeće razine sigurnosti.

Prva razina osiguranja, takozvani ne sigurnosni sustavi, djeluju u svakodnevnom radu elektrane kontrolirajući kratkotrajne prijelazne promjene i oscilacije u uvjetima rada. U slučaju promjena koje bi mogle dovesti do pregrijavanja jezgri, ovi sustavi smanjuju mogućnost nepotrebnog pokretanja i djelovanja ostalih sigurnosnih sustava.

Pasivni sigurnosni sustavi i oprema AP1000 reaktora dovoljni su da bi automatski uspostavili i održavali dovoljno hlađenje jezgre i održali integritet zaštitne posude na neodređeno vrijeme u slučaju kvara, bez reakcije operatera do 72 sata i bez izvora električne energije sa ili izvan lokacije elektrane.

Elektrana je konstruirana tako da u slučaju pregrijavanja jezgre isprazni spremnik vode velikog kapaciteta u reaktorsku šupljinu. Ta voda omogućava hlađenje reaktorske posude izvana čime se sprječava njeno zatajenje i naknadno izlijevanje rastaljenih ostataka jezgre u zaštitnu posudu. Navedeno zadržavanje rastaljenih ostataka također smanjuje nesigurnost u ocjenjivanju kvara zaštitne posude i otpuštanja radioaktivnosti u okoliš zbog ozbiljne nezgode kao na primjer reakcije rastaljene jezgre i betona zaštitne posude.

Obloga goriva predstavlja prvu barijeru ispuštanja zračenja u slučaju nezgode. Reaktorska tlačna posuda i cjevovod rashladne tekućine reaktora neovisne su barijere sprječavanje ispuštanja zračenja. Treću razinu zaštite od istjecanja radijacije u okoliš čini čelična zaštitna posuda zajedno sa zaštitnom zgradom koja ju okružuje uz hlađenje prirodnom konvekcijom. Prirodna konvekcija može se poboljšati hlađenjem latentnom toplinom vode iz velikog spremnika smještenog na vrhu zaštitne zgrade, na čeličnoj zaštitnoj posudi.

Sustavi pasivne zaštite su značajno jednostavniji od klasičnih PWR sigurnosnih sustava. Sastoje se od mnogostruko manjeg broja komponenti, što posljedično smanjuje broj potrebnih testiranja, inspekcija i olakšava održavanje. U odnosu na klasične sigurnosne sustave sadržavaju trećinu daljinski upravljanih ventila,, a nemaju niti jednu pumpu. Takvi sustavi također ne zahtijevaju radikalne izmjene reaktora ili zaštitne posude. Elementi klasičnih

sigurnosnih sustava, kao npr. diesel generatori i njihovi sustavi podrške, nisu više od kritične važnosti za sigurnost elektrane tako da su ili pojednostavljeni ili kompletno eliminirani.

Probabilističke analize rizika AP1000 nuklearne elektrane pokazuju vjerojatnost taljenja jezgre od 4,2 $x10^{-7}$/godini, odnosno jedna u 2 380 000 godina rada reaktora. Izračunata vjerojatnost ispuštanja veće količine zračenja je 3,7 $x10^{-8}$/godini, odnosno jedna u 27 000 000 godina rada reaktora [12].

Pojednostavljenja u konstrukciji i dizajnu ovakve elektrane izravno smanjuju njen trošak investicije i vrijeme izgradnje. Prema postojećim nuklearnim elektranama iste nazivne snage (1000 MW), AP1000 ima 60 % manje ventila, 75 % manju duljinu cjevovoda, 80 % manje kontrolnih kablova, 35 % manje pumpi, a seizmički otporna zgrada (unutar koje se nalazi reaktor) je 50 % manjeg volumena.

Na ovaj način pojednostavljena i sigurna elektrana predstavlja veliki napredak u korištenju nuklearne energije u svijetu. Uz niže troškove investicije postaje konkurentnija na tržištu i uz visoku razinu sigurnosti ovakva nuklearna elektrana je i društveno prihvatljivija i predstavlja dobar i konstantan izvor električne energije za budućnost.

5. IZRAČUN I USPOREDBA TROŠKOVA IZGRADNJE I CIJENE ELEKTRIČNE ENERGIJE NUKLEARNIH ELEKTRANA I POSTROJENJA BAZIRANIH NA DRUGIM TEHNOLOGIJAMA

5.1. Metoda proračuna

Kao metoda za uspoređivanje ekonomske isplativosti navedenih tehnologija koristi se nivelirana cijena električne energije. Nivelirana cijena električne energije računa se prema postupku prikazanom u studiji konzultantske tvrtke Ecofys za Europsku komisiju iz 2014. godine "Subsidies and costs of EU energy" [13] i 16. poglavlju knjige "Nuklearne elektrane" [9]. Nivelirana cijena električne energije računa se kao omjer zbroja godišnjih troškova kapitala, goriva, održavanja i pogona prema godišnjoj količini proizvedene električne energije, kao što je prikazano u jednadžbi (1). Godišnji troškovi kapitala ovise o investicijskim ulaganjima, uvjetima otplate kredita i diskontnoj stopi. Troškovi pogona i održavanja su zbroj svih pojedinačnih troškova pogona i održavanja nastalih tijekom cijelog radnog vijeka elektrane uključujući remonte i rekonstrukcije.

$$C = \frac{C_{\mathrm{i}} + C_{\mathrm{po}} + C_{\mathrm{g}}}{E} \tag{1}$$

gdje su:

C - nivelirana cijena električne energije

C_{i} - godišnji troškovi kapitala tijekom pogona elektrane svedeni na početak komercijalnog pogona

C_{po} - troškovi pogona i održavanja

C_{g} - troškovi goriva za vrijeme pogona elektrane

E - godišnje proizvedena električna energija

Zbog trajanja projekta izgradnje i korištenja energetskog objekta, potrebno je sve troškove svesti na nultu godinu, godinu početka investicije. U tu svrhu koristi se faktor povrata kapitala. To je faktor koji određuje godišnju ratu (anuitet) potrebnu da se isplati sadašnji iznos investicije uz određenu diskontnu stopu. Izračun anuiteta prikazan je jednadžbom (2) dok je faktora povrata kapitala prikazan jednadžbom (3).

$$C_{\mathrm{i}} = \alpha I_{\mathrm{F}} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-L_{\mathrm{T}}}} \tag{3}$$

gdje su:

α - faktor povrata kapitala

I_F - investicijski troškovi, s troškovima financiranja

r - nivelirana diskontna stopa, prosječna stopa troškova kapitala

L_T - životni vijek elektrane

Nivelirana diskontna stopa, koja se koristi za dobivanje sadašnje vrijednosti novca (zbog različite vremenske vrijednosti novca sadašnjeg i budućeg kapitala), računa se prema jednadžbi (4). Za izračun se uzima u obzir udio vlastitog kapitala, odnosno njegov trošak i udio kapitala dobivenog zaduživanjem (dugoročnim kreditima) i njegov trošak.

$$r = (1 - UVK)(1 - p)TZ + UVK \cdot k_S \tag{4}$$

gdje su:

UVK - udio vlastitog kapitala

p - stopa poreza

TZ - trošak zaduživanja

k_S - trošak vlastitog kapitala

Trošak vlastitog kapitala računa se kao zbroj nerizične kamatne stope, tržišne premije, premije rizika tehnologije i premije rizika nelikvidnosti kao što je prikazano jednadžbom (5). Nerizična kamatna stopa je kamatna stopa koja se dobiva na nerizična ulaganja (npr. državni vrijednosni papiri). Premija rizika je razlika između očekivanog prinosa rizične i bezrizične investicije [14].

$$k_S = k_F + k_R + k_{TEH} + k_L \tag{5}$$

gdje su:

k_F - nerizična kamatna stopa

k_R - premija rizika

k_{TEH} - premija rizika tehnologije

k_L - premija rizika nelikvidnosti

Investicijski troškovi s financijskim troškovima uz kamatu na kredit *i* i faktor troška dekomisije računaju se jednadžbom (6) uz korištenje iznosa investicijskih troškova bez troškova

financiranja. Investicijska ulaganja u gradnju objekta određuju se kao zbroj svih pojedinačnih ulaganja tijekom gradnje, od kojih se svako svodi na dan početka komercijalnog pogona elektrane (pretpostavlja se da su jednoliko raspoređeni tijekom razdoblja izgradnje).

$$I_{\mathrm{F}} = \frac{I}{L_{\mathrm{B}}} \sum_{t=1}^{L_{\mathrm{B}}} (1+i)^t \left(1 + \frac{d}{(1+r)^{L_{\mathrm{T}}}}\right) \tag{6}$$

gdje su:

I - investicijski troškovi, bez troškova financiranja

L_B - trajanje izgradnje elektrane

d - faktor troška dekomisije

Zadnji pribrojnik u brojniku jednadžbe (1), trošak goriva, računa se kao umnožak cijene goriva korištenog za pogon i ukupno proizvedene električne energije u godinu dana pogona elektrane podijeljenog sa stupnjem iskoristivosti procesa. Ukupno proizvedena električna energija računa se kao umnožak snage i faktora opterećenja (punih radnih sati godišnje) (8).

$$C_{\mathrm{g}} = CG \frac{E}{\eta_{\mathrm{E}}} \tag{7}$$

$$E = P \cdot FO \tag{8}$$

gdje su:

CG - cijena goriva

η_E - stupanj iskoristivosti procesa

P - snaga

FO - faktor opterećenja, broj radnih sati godišnje na punom opterećenju

Opisana metoda proračuna nivelirane cijene električne energije može se upotrijebiti za usporedbu ekonomskih parametara raznovrsnih elektroenergetskih objekata. Ova metoda može se, također, koristi za ocjenu isplativosti izgradnje pojedine elektrane. Metoda omogućava analizu utjecaja investicijskih ulaganja, troškova kredita, održavanja, goriva te pogonske pouzdanosti objekta na ekonomsku isplativost. Pogonska pouzdanost izražava se faktorom opterećenja *FO.*

Godišnji troškovi kapitala, pogona, održavanja i goriva te proizvodnja električne energije mijenjaju se iz godine u godinu, a zbog toga se, naravno, svake godine mijenja i cijena proizvedene električne energije.

5.2. Pretpostavke proračuna

Udio vlastitog kapitala korišten u proračunu fiksan je za sve članice EU, odnosno 40 % za elektrane na fosilna goriva i nuklearne elektrane, a 25 % za obnovljive izvore energije [13]. Stopa poreza uzeta je za Hrvatsku, odnosno 20 % [15]. Korišteni postotak troška zaduženja je 5 % kao prosječni tržišna vrijednost [13]. Za nerizičnu kamatnu stopu korištena je vrijednost kamate na Njemačke državne obveznice u periodu 10 godina (prosjek 2013. godine) od 1,57 % [13], dok je tržišna premija za Republiku Hrvatsku 7,8 % [13]. Premija rizika tehnologije ista je za sve članice EU i iznosi 5 % za elektrane na ugljen, 8 % za nuklearne elektrane, 0 % za solarne panele i 3 % za kopnene vjetroelektrane [13]. Premija rizika nelikvidnosti iznosi 3 % [13]. Kamata na kredit korištena iznosi 5 % [13].

Trajanje projekta, odnosno tehnički životni vijek, najviši je za nuklearne elektrane i iznosi 60 godina, dok je za ugljene elektrane 40 godina, a za tehnologije vjetroelektrana i solarnih panela 25 godina [13] [16]. Trajanje izgradnje nuklearnih elektrana je također najdulje, odnosno sedam godina, za elektrane na ugljen četiri godine, a za solarne panele i vjetroelektrane samo godinu dana.

Investicijski trošak izgradnje nuklearne elektrane varira ovisno o vrsti reaktora nuklearne elektrane, državi (regiji) u kojoj se elektrana gradi i o nizu drugih parametara. Vrijednost od 4000 USD/kW odgovara prosječnoj cijeni izgradnje nuklearne elektrane u EU [13], medijanu promatranih PWR nuklearnih elektrana u studiji IEA (uz standardnu devijaciju od 1330 USD/kW) [16] i u užem je intervalu prikaza nesigurnosti cijene investicijskih troškova za Europu prema WNA (World Nuclear Association) [17]. Cijena investicije u elektranu na ugljen je uzeta 1600 USD/kW [13] [18] kao relevantnija od 2100 USD/kW [16] zbog novijeg datuma istraživanja. Cijena solarnih panela drastično je pala u razdoblju od 2010. do 2012. godine i za referentnu vrijednost cijene investicije je uzeto 1800 USD/kW, a za investiciju vjetroelektrane 1700 USD/kW [13] [18]. Troškovi dekomisije nuklearne elektrane uzeti su u iznosu od 15 % investicije [13] [16], a za ostale tehnologije 5 % (približna vrijednost koja ima malen utjecaj na konačni rezultat) [16].

Za troškove pogona i održavanja korišteni su medijani promatranih slučaja studije IEA [16]. Standardna devijacija vrijednosti troškova pogona i održavanja vjetroelektrane i solarnih panela je visoka te uzrokuje nepouzdanost tog dijela rezultata (10,21 USD/MWh za vjetroelektranu i čak 24,07 USD/MWh za solarne panele). Prosječne vrijednosti punih radnih sati godišnje za EU korištene su u proračunu [13]. Omjerom stvarne godišnje proizvedene električne energije i električne energije koja bi se proizvela kada bi elektrana radila cijelu godinu sa 100 %-tnim opterećenjem, dolazi se do vrijednosti punih radnih sati godišnje (umnožak tog omjera i ukupnog broja sati u jednoj godini). Prosječne vrijednosti stupnja iskoristivosti procesa za pojedinu tehnologiju korištene su u proračunu [13] [16]. Cijena goriva nuklearnih elektrana uključuje cijenu iskopa, obogaćivanja, izrade gorivih šipki te transport, reprocesiranje, odlaganje

i skladištenje istrošenog goriva u 2012. godini [13] [16]. Prosječna cijena ugljena u EU 2012. godine iznosi 3,5 €/GJ što približno odgovara i cijeni ugljena u Hrvatskoj od 3,6 €/GJ [13]. Trošak emisije CO_2 preuzet je iz studije IEA [16].

5.3. Rezultati proračuna

Tablica 5. prikazuje proračun nivelirane diskontne stope za svaku od četiri promatrane tehnologije proizvodnje električne energije. Nuklearne elektrane imaju najvišu diskontnu stopu dok tehnologije obnovljivih izvora energije imaju najmanju. Za trošak vlastitog kapitala također vrijedi isti zaključak, koji se poklapa s rezultatima studije Ecofys (2014.) [13].

Tablica 5. Proračun nivelirane diskontne stope

	Nuklearna elektrana	Elektrana na ugljen	Krovni solarni paneli	Kopnena vjetroelektrana
Udio vlastitog kapitala	40%	40%	25%	25%
Stopa poreza	20%	20%	20%	20%
Trošak zaduženja	5%	5%	5%	5%
Nerizična kamatna stopa	1,57%	1,57%	1,57%	1,57%
Tržišna premija	7,8%	7,8%	7,8%	7,8%
Premija rizika tehnologije	8%	5%	0%	3%
Premija rizika nelikvidnosti	3%	3%	3%	3%
Trošak vlastitog kapitala	20,37%	17,37%	12,37%	15,37%
Nivelirana diskontna stopa	10,55%	9,35%	6,09%	6,84%

Najviša diskontna stopa uzrokuje i najveći udio financijskih troškova u investicijskim troškovima I_F od čak 18,15 % dok je u slučaju vjetroelektrana taj udio samo 5,4 %. Usprkos najduljem životnom vijeku nuklearne elektrane od 60 godina faktor povrata kapitala nuklearne elektrane α najviši je između sve četiri tehnologije (Tablica 6.).

Tablica 6. Proračun faktora povrata kapitala i investicije s financijskim troškovima

	Nuklearna elektrana	Elektrana na ugljen	Krovni solarni paneli	Kopnena vjetroelektrana
Diskontna stopa	10,55%	9,35%	6,09%	6,84%
Trajanje projekta [god]	60	40	25	25
Faktor povrata kapitala	10,57%	9,62%	7,89%	8,46%
Trajanje izgradnje [god]	7	4	1	1
Kamata	5%	5%	5%	5%
Investicija bez financijskih troškova [USD/kW]	4.000,00	1.600,00	1.800,00	1.700,00
Dekomisija	15%	5%	5%	5%
Investicija s financijskim troškovima [USD/kW]	4.886,97	1.812,55	1.904,15	1.796,72

U Tablici 7. prikazane su odabrane vrijednosti troškova pogona i održavanja [16] IEA (International Energy Agency): "Projected Costs of Generating Electricity", 2010.], ali i prosječni godišnji radni sati promatranih elektrana u EU [13]. Usprkos duplo višoj cijeni troškova održavanja i pogona solarnih elektrana u odnosu na nuklearne elektrane (po MWh), ukupni godišnji troškovi nuklearne elektrane su skoro tri puta veći (po MW).

Tablica 7. Proračun godišnjih troškova pogona i održavanja

	Nuklearna elektrana	Elektrana na ugljen	Krovni solarni paneli	Kopnena vjetroelektrana
Troškovi pogona i održavanja [USD/MWh]	14,74	6,02	29,95	21,92
Snaga [MW]	1	1	1	1
Radni sati godišnje [h/god]	6785	4318	1169	1979
Godišnji troškovi pogona i održavanja [USD/god]	100.010,90	25.994,36	35.011,55	43.379,68

Tablicom 8. prikazan je proračun godišnjeg troška goriva nuklearne elektrane i elektrane na ugljen, dok je taj trošak za tehnologije bazirane na obnovljivim izvorima energije jednak nuli. Tablicom 9. prikazan je konačni proračun nivelirane cijene električne energije, iz kojeg se može prikazati promatrane tehnologije proizvodnje električne energije redoslijedom od najpovoljnije do najskuplje: vjetroelektrana, elektrana na ugljen, nuklearna elektrana i krovni solarni paneli.

Tablica 8. Proračun godišnjeg troška goriva

	Nuklearna elektrana	Elektrana na ugljen	Krovni solarni paneli	Kopnena vjetroelektrana
Snaga [MW]	1	1	1	1
Radni sati godišnje [h/god]	6785	4318	1169	1979
Stupanj iskoristivosti	33%	45%	100%	100%
Cijena goriva [USD/MWh]	9,32	14,40	0,00	0,00
Godišnji trošak goriva [USD/god]	191.707,09	138.176,00	-	-

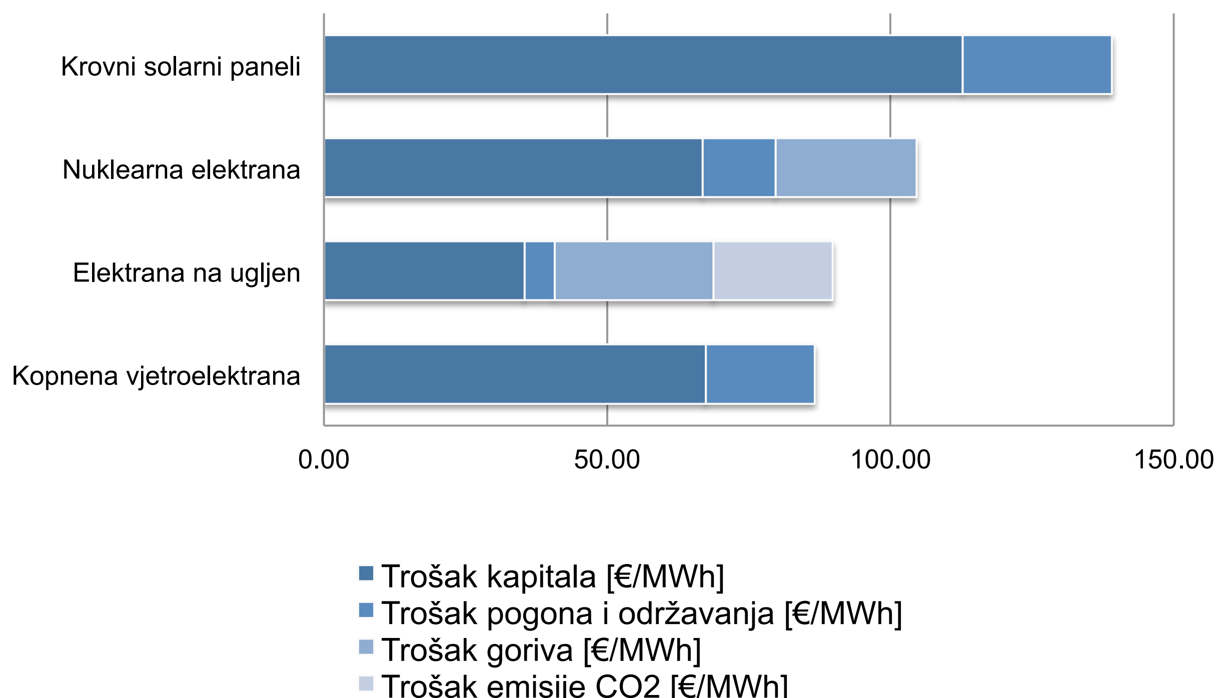
Tablica 9. Proračun nivelirane cijene električne energije

	Nuklearna elektrana	Elektrana na ugljen	Krovni solarni paneli	Kopnena vjetroelektrana
Godišnji trošak kapitala [USD/god]	516.736,77	174.322,93	150.267,12	151.996,25
Godišnji troškovi pogona i održavanja [USD/god]	100.010,90	25.994,36	35.011,55	43.379,68
Godišnji trošak goriva [USD/god]	191.707,09	138.176,00	-	-
Godišnje proizvedene električne energije [MWh/godina]	6785	4318	1169	1979
Cijena emisije CO2 [USD/MWh]	-	23,96	-	-
Nivelirana cijena električne energije [USD/MWh]	119,15	102,35	158,49	98,72
Nivelirana cijena električne energije [€/MWh]	104,56	89,81	139,08	86,63

Kod najpovoljnijeg izvora električne energije, vjetroelektrane, najveći dio troškova je osnovni trošak kapitala (početna investicija) i to čak 77,8 %. Solarni paneli također imaju visok utjecaj početne investicije na niveliranu cijenu električne energije, odnosno 81,1 %. Elektrana na ugljen je jedina od promatranih elektrana s utjecajem troška kapitala manjim od 50 %, točnije 39,4 %. Ove vrijednosti prikazane su u Tablici 10. i dijagramom na Slici 6.

Tablica 10. Utjecaj pojedinog faktora na ukupnu niveliranu cijenu električne energije

	Kopnena vjetroelektrana		Elektrana na ugljen		Nuklearna elektrana		Krovni solarni paneli	
Trošak kapitala [€/MWh]	67,40	77,8%	35,43	39,4%	66,83	63,9%	112,80	81,1%
Trošak pogona i održavanja [€/MWh]	19,23	22,2%	5,28	5,9%	12,93	12,4%	26,28	18,9%
Trošak goriva [€/MWh]	0,00	0,0%	28,08	31,3%	24,79	23,7%	0,00	0,0%
Trošak emisije CO2 [€/MWh]	-	0,0%	21,02	23,4%	-	0,0%	-	0,0%
Nivelirana cijena električne energije [€/MWh]	**86,63**	100,0%	**89,81**	100,0%	**104,56**	100,0%	**139,08**	100,0%



Slika 6. Utjecaj pojedinog faktora na ukupnu niveliranu cijenu električne energije

S obzirom da elektrane na ugljen imaju izrazito nisku investicijsku cijenu trenutno su izrazito povoljne s niveliranom cijenom električne energije od 89,81 €/MWh, ali zbog promjenjivosti tržišne cijene ugljena i mogućnosti regulacije tržišne cijene emisije CO_2 od strane EU, ta cijena je izrazito nesigurna, a time i isplativost elektrane na ugljen tijekom njenog životnog vijeka od 40 godina.

Vjetroelektrane, premda predstavljaju intermitentni izvor energije, trenutno su prema ovom proračunu najisplativije. Razvojem tehnologije vjetroelektrana dolazi do povećanja njihovog faktora opterećenja, a time i njihove ekonomske isplativosti. Međutim, uz ovakav proračun potrebno bi bilo provesti proračun eksternih troškova vjetroelektrana kako bi se mogla provesti realna usporedba najisplativijih izvora električne energije. Investicijski troškovi u krovne solarne panele su doživjeli nagli pad s prosječne cijene od 4 237 €/MW u 2008. godini na 1695 €/MW u 2012. godini [13], te bi uz nastavak tog trenda mogli postati konkurentno isplativ izvor energije u budućnosti.

Za pokrivanje osnovnih potreba za električnom energijom, kao stalni i sigurni, a pri tome i ekonomski opravdan i isplativ izvor električne energije nuklearne elektrane predstavljaju dobar izbor. U primjeru AP1000 nuklearne elektrane, troškovi izgradnje i održavanja niži su od 4000 USD/kW zbog pojednostavljenog dizajna. Daljnjim razvitkom tehnologije nuklearnih reaktora ta cijena će zasigurno nastaviti padati, a sve višim sigurnosnim standardima izgradnje i pogona nuklearne elektrane će postati društveno prihvatljivije.

6. ZAKLJUČAK

Raspoloživost električne energije je preduvjet za gospodarski razvoj i standard stanovništva. Iz tih razloga ograničavanje proizvodnje električne energije nije opcija te je u svrhu očuvanja okoliša potrebno odabrati ekološki prihvatljiviji izvor energije. Obnovljivi izvori, a nakon njih nuklearne elektrane najmanje oštećuju okoliš, te za razliku od elektrana na fosilna goriva, pri proizvodnji nemaju emisiju stakleničkih plinova. Na žalost, obnovljivi izvori zbog svoje intermitentne prirode ne mogu biti elektrane za pokrivanje baznih potreba za električnom energijom, no nuklearne elektrane mogu. Uzevši to u obzir, nuklearna energija se postavlja kao odlična zamjena baznim elektranama na fosilna goriva i u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije djeluje u cilju smanjenja negativnog ljudskog utjecaja na okoliš.

Prema ekonomskoj analizi isplativosti prikazanoj u ovom radu, ukupni troškovi nuklearne elektrane veći su od vjetroelektrana i elektrana na ugljen. Međutim, vjetroelektrane predstavljaju nepredvidljiv i intermitentan izvor uz koji je potreban stalni i siguran izvor električne energije. Kako ne ovise o vremenskim uvjetima, elektrane na ugljen i nuklearne elektrane mogu poslužiti kao konstantni proizvođači električne energije. Elektrane na ugljen imaju znatno lošiji utjecaj na okoliš od nuklearnih elektrana, te analiza strukture troškova ukazuje da je cijena električne energije koju proizvode podložna velikim promjenama. Cijena emisije CO_2 na svjetskom tržištu je nepredvidiva, a tako i cijena ugljena (iako manje nego ostala fosilna goriva) pogotovo na razdoblje od 40 godina, koliko traje projekt takvih elektrana. Ova dva parametra predstavljaju više od 50 % nivelirane cijene električne energije elektrane na ugljen, dok je kod nuklearnih elektrana trošak goriva manji od 25 %.

Današnji standardi sigurnosti nuklearnih elektrana na visokoj su razini, primjer za to je Westinghouse AP1000. Uz vjerojatnost taljenja jezgre reaktora jednom u 2 380 000 godina rada reaktora i životni vijek takve elektrane od 60 godina, dobivamo brojku od skoro 40 000 reaktora koji bi u cijelom svojem životnom vijeku zajedno doživjeli jedno taljenje jezgre. S obzirom da se moderne nuklearne elektrane konstruiraju prema filozofiji "obrana po dubini", vjerojatnost istjecanja velike količine zračenja u slučaju taljenja jezgre još je manja.

Sve jači dokazi o globalnom zatopljenju mogu povećati otpor prema populacije prema korištenju fosilnih goriva, a razvojem nuklearne tehnologije moguće je smanjiti rizike radiološkog onečišćenja što može dovesti do promjena u percepciji nuklearne energije kao nečiste tehnologije.

LITERATURA

[1] EIA (U.S. Energy Information Administration), s interneta, http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12&cid=regions&syid=2012&eyid=2012&unit=BKWH, 17. veljače 2015.

[2] Pushker A. Kharecha; James E. Hansen: "Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power", Environmental Science & Technology, 2013.

[3] IAEA (International Atomic Energy Agency), s Interneta, http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByRegion.aspx, 29. prosinca 2014.

[4] IAEA (International Atomic Energy Agency), s Interneta, http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByRegion.aspx, 29. prosinca 2014.

[5] IAEA (International Atomic Energy Agency), s Interneta, http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByType.aspx, 29. prosinca 2014.

[6] IAEA (International Atomic Energy Agency), s Interneta, http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx, 29. prosinca 2014.

[7] Feretić, Danilo: "Neki temeljni problemi proizvodnje električne energije u Hrvatskoj u kratkoročnom i srednjoročnom razdoblju", Zagreb

[8] Prelec, Zmagoslav: "Gospodarenje otpadom: Opasni/radioaktivni otpad", s Interneta, http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra4/Inzenjerstvo_zastite_okolisa/11.pdf

[9] Feretić, Danilo; Čavlina, Nikola; Debrecin, Nenad: "Nuklearne elektrane", Školska knjiga, Zagreb, 1995.

[10] NC State University: "Radiation Safety and ALARA", s Interneta, http://www.ncsu.edu/ehs/radiation/forms/alara.pdf, 8. veljače 2015.

[11] Westinghouse Electric Company, s Interneta, http://westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR/Safety, 2. veljače 2015.

[12] Terry L. Schulz: "Westinghouse AP1000 advanced passive plant", Nuclear Engineering and Design, 2006.

[13] Alberici, Sacha et al.: "Subsidies and costs of EU energy", Ecofys by order of: European Commission, 10. listopada 2014.

[14] Miloš Sprčić,Danijela: "Vremenska vrijednost novca", s interneta, http://web.efzg.hr/dok/EPO/finanaliza//ofp-materijali/OFP-3.VREMENSKA_VRIJEDNOST_NOVCA.pdf, Ekonomski Fakultet Zagreb, 15. veljače 2015.

[15] KPMG: "Corporate tax rates table", s interneta, http://www.kpmg.com/global/en/services/tax/tax-tools-and-resources/pages/corporate-tax-rates-table.aspx, 14. veljače 2015.

[16] IEA (International Energy Agency): "Projected Costs of Generating Electricity", 2010.

[17] WNA (World Nuclear Association): "The Economics of Nuclear Power", s interneta, http://www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power/, 15. veljače 2015.

[18] Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems: "Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies", studeni 2013.